

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ

Школа бакалавриата

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
Схема формирования суммарно-разностных каналов радиолокатора

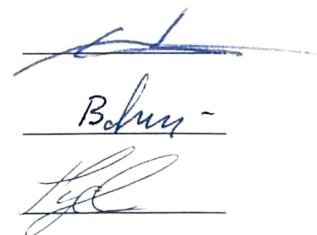
ИРИТ 110301 215 ПЗ

Руководитель: Шабунин Сергей Николаевич
д.т.н., доцент, заведующий кафедрой РиТ ИРИТ-РТФ

Нормоконтролер: Учеткин В.А.

Студент группы РИ-400006

Гусев Данил Олегович



В.А. Учеткин -
Гусев Д.О.

Екатеринбург, 2024

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка содержит 41 с., 12 рис., 5 табл., 19 источн., 2 прил.

РАДИОЛОКАТОР, ФАЗИРОВАННАЯ АНТЕННАЯ РЕШЁТКА, МОНОИМПУЛЬСНАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ, СХЕМА ФОРМИРОВАНИЯ СУММАРНО-РАЗНОСТНЫХ КАНАЛОВ, КОЛЬЦЕВОЙ МОСТ

Объектом разработки является оригинальная специфицированная сборочная единица вспомогательного производства – схема формирования суммарно-разностных каналов радиолокатора. Цель работы – разработка микрополоскового 14-полюсника.

Работа проводилась эмпирическим методом моделирования, суть которого заключается в создании копии объекта и его последующем анализе.

В результате работы был получен прототип схемы формирования суммарно-разностных каналов, реализованный микрополосковой технологией изготовления. Научная новизна состоит в том, что схема содержит планарную структуру, использует стеклотекстолит отечественного производства, возбуждается коаксиальной линией передачи.

Результаты могут будут использованы при изготовлении антенных систем трёх координатных радиолокационных станций.

Разработанная схема позволяет производить трёх координатные радиолокационные системы с меньшим временем обработки и большей точностью по сравнению с одноканальными радиолокационными станциями.

С точки зрения технико-экономической эффективности внедрения проекта, было выявлено, что проектируемое устройство при производстве экономически выгодно: экономическая эффективность $E=0,101$, срок окупаемости капиталовложений составляет $T_1=6,9$ года.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ	6
1 Аналитический обзор.....	8
2 Математическая модель	9
2.1 Несимметричная микрополосковая линия передачи	9
2.2 Кольцевой мост	12
2.3 Схема суммарно-разностных каналов	15
3 Разработка и проектирование в САПР	18
4 Программа экспериментальных исследований.....	26
4.1 Описание технических средств	26
4.2 Порядок проведение измерений параметров устройства	27
4.3 Проведение измерений прототипа	28
5 Техничко-экономическое обоснование внедрения устройства в серийное производство.....	31
6 Обзор метода производства	34
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	36
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	37
ПРИЛОЖЕНИЕ А	40
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	41

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящей пояснительной записке к выпускной квалификационной работе применяются следующие сокращения и обозначения.

КСВ – коэффициент стоячей волны

ЛП – линия передачи

РЛС – радиолокационная станция

САПР – система автоматизированного проектирования

c – скорость света, $\frac{м}{с}$

f – частота колебаний, Гц

f_p – вспомогательный частотный параметр, Гц

G – приведённое волновое сопротивление, Ом

h – толщина диэлектрической подложки, м

L – расстояние между плечами волноводного моста, м

t – толщина проводника, м

x_{50} – оптимальный отступ при изгибе линии с сопротивлением $\rho=50$ Ом, м

x_{75} – оптимальный отступ при изгибе линии с сопротивлением $\rho=75$ Ом, м

w – ширина проводника, м

w_{eff} – эффективная ширина проводника, м

Δw – эквивалентное расширение, м

W_{50} – ширина проводника при волновом сопротивлении $\rho=50$ Ом, м

W_{75} – ширина проводника при волновом сопротивлении $\rho=75$ Ом, м

$W_{50 \text{ шлейф}}$ – ширина проводника шлейфа нагрузки, м

Z_{Bs} – опорное волновое сопротивление линии микрополосковой линии с шириной w_{eff} и толщиной диэлектрического слоя h без учёта частотной зависимости диэлектрической проницаемости, Ом

Z_{Bf} – волновое сопротивление линии с учётом частотной дисперсии, Ом

Z_K – волновое сопротивление кольцевого моста, Ом

α_{50} – потери в линии с волновым сопротивлением $\rho=50 \text{ Ом}$, $\frac{\text{дБ}}{\text{м}}$

$\alpha_{50\cdot\sqrt{2}}$ – потери в линии с волновым сопротивлением $\rho=50 \cdot \sqrt{2} \text{ Ом}$, $\frac{\text{дБ}}{\text{м}}$

ε – относительная диэлектрическая проницаемость

ε_{ref} – эффективная диэлектрическая проницаемость

ε_{reft} – эффективная диэлектрическая проницаемость с учётом толщины проводника

ε_{reff} – эффективная диэлектрическая проницаемость с учётом частотной дисперсии

ε_0 – электрическая постоянная

λ – длина волны, м

$\lambda_{\text{л}}$ – длина волны в линии, м

ρ – волновое сопротивление, Ом

$\text{tg}(\delta)$ – тангенс угла диэлектрических потерь

ВВЕДЕНИЕ

Согласно информации с сайта [1] моноимпульсная радиолокация используется для сопровождения воздушных целей вторичным радиолокатором «Аврора». Полученный антенной системой радиолокационной станции (далее – РЛС), сигнал поступает на схему формирования суммарно-разностных каналов радиолокатора, являющейся объектом разработки.

При уходе с российского рынка иностранных производителей возросла необходимость импортозамещения. В перечень импортозамещаемых товаров, согласно информации с сайта [2] входит и схема формирования суммарно-разностных каналов радиолокатора.

Заданием на выполнение выпускной квалификационной работы было спроектировать схему формирования суммарно-разностных каналов радиолокатора опираясь на исходные данные к работе:

- микрополосковая технология производства;
- частота $f=1,68$ ГГц;
- коэффициент стоячей волны (далее – КСВ) меньше 1,2;
- развязка между каналами 30 дБ;
- полоса рабочего диапазона $\Delta f=0,04$ ГГц;
- схема представляет собой 14-полюсник, выполненный в одной плоскости, четыре входа которого подключаются к одной из четырёх подрешёток антенной системы радиолокатора, с одного входа снимается сигнал, пропорциональный суммарному принимаемому всеми четырьмя подрешётками, с двух оставшихся - разностный сигнал, соответственно, в вертикальной и горизонтальной плоскостях;
- разъёмы предварительно N-типа.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- произвести обзор источников и выбрать схему построения;

- произвести расчёт параметров микрополосковой линии передачи;
- произвести моделирование конструкции и параметров устройства в системе автоматизированного проектирования (далее – САПР) и по результатам принять решение о дальнейшей работе;
- разработать топологию устройства;
- изготовить макет устройства;
- произвести измерение параметров устройства.

Метрологическим обеспечением в данной работе являлось:

- программное обеспечение для моделирования *ANSYS HFSS* 19.2 (академическая лицензия);
- программное обеспечение для моделирования *AWR Design Environment* 13 (академическая лицензия);
- векторный анализатор цепей (*ROHDE&SCHWARZ ZVH8*).

Проведение разработки необходимо для создания российского модуля РЛС и повышения технических характеристик схемы формирования каналов.

Точность измерений техническим заданием не установлена.

1 Аналитический обзор

По вопросу проектирования схемы моноимпульсной РЛС были рассмотрены патенты [3] и [4] из-за совпадения объектов разработки.

Был использован эмпирический метод сравнения, суть которого заключается в сопоставлении исследуемому объекту уже известного, которое изучалось ранее.

При анализе патентов наблюдаются тенденции – использование трёх токонесущих слоёв с последующим уменьшением габаритов схемы формирования суммарно-разностных каналов радиолокатора и возбуждение полосковой линией передачи. Метод образования суммарного и разностных каналов основывается на комбинировании кольцевых мостов.

Задачей на выполнение выпускной квалификационной работы является проектирование планарной схемы формирования суммарно-разностных каналов с коаксиальным возбуждением, что идёт в разрез тенденциям, но даёт возможность использования с современными радиотехническими средствами.

В разрабатываемом устройстве используются разъёмы $N - 245$ с волновым сопротивлением 50 Ом и типом центрального контакта – гнездо; два токонесущих слоя, уменьшающих количество технологических процессов и значительно упрощая контроль изделия.

2 Математическая модель

2.1 Несимметричная микрополосковая линия передачи

Микрополосковая линия передачи используются преимущественно в сантиметровом и дециметровых диапазонах. Согласно техническому заданию, длина волны в вакууме, на центральной частоте $f=1,68$ ГГц составляет $\lambda=0,17845$ м.

Основной волной полосковой линии передачи согласно учебнику [5] является волна – *ТЕМ* ($E_z=0$, $H_z=0$).

Возникновение волн высшего порядка исключается, если эквивалентная ширина проводящего материала, как и толщина диэлектрика меньше половины длины волны в диэлектрике $\lambda_d/2=0,047605$ м ($w_{eff} < \lambda_d/2$, $h < \lambda_d/2$).

Для расчёта параметров линии опорным значением является частота колебаний $f=1,68$ ГГц.

Для обеспечения работы на высоком уровне входной СВЧ мощности в широкой полосе частот проводящий слой должен располагаться на подложке из материала с высокой теплопроводностью и низким значением относительной диэлектрической проницаемости. При проектировании схемы в качестве диэлектрического материала был выбран стеклотекстолит СФ-2-35Г.

Фольгированные материалы, облицованные электрической гальваностойкой фольгой толщиной $t=0,000035$ м, предназначены для изготовления одно- и двусторонних плат химическим и комбинированным методами.

Толщина подложки выбиралась из условия, что не возникает волна высшего порядка. Имеющийся у учебного заведения стеклотекстолит имеет толщину $h=0,002$ м, значение диэлектрической проницаемости материала на частоте $f=1$ МГц равно $\varepsilon=5,5$.

Ввиду частотной дисперсии согласно учебнику [5] отношение эквивалентного расширения проводящей линии Δw к толщине диэлектрической подложки рассчитывается по формуле:

$$\frac{\Delta w}{h} = \begin{cases} \frac{1,25 \cdot t}{\pi \cdot h} \cdot \left(1 + \ln \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot w}{t}\right)\right), \frac{w}{h} < \frac{1}{2 \cdot \pi}, \\ \frac{1,25 \cdot t}{\pi \cdot h} \cdot \left(1 + \ln \left(\frac{2 \cdot h}{t}\right)\right), \frac{w}{h} \geq \frac{1}{2 \cdot \pi}. \end{cases} \quad (1)$$

Используя соотношение формулы (1), эффективная ширина проводника, рассчитывается по формуле:

$$w_{eff} = \begin{cases} w, \frac{t}{h} \leq 0,005, \\ w + \Delta w, \frac{t}{h} > 0,005. \end{cases} \quad (2)$$

Согласно учебнику [5] и [6] диэлектрическая проницаемость имеет зависимость от эффективной ширины проводника и толщины диэлектрического материала, которая представлена в формуле:

$$\varepsilon_{ref} = \begin{cases} \frac{\varepsilon+1}{2} + \frac{\varepsilon-1}{2} \cdot \left(1 + \frac{12 \cdot h}{2}\right)^{-\frac{1}{2}}, \frac{w}{h} \geq 1, \\ \frac{\varepsilon+1}{2} + \frac{\varepsilon-1}{2} \cdot \left(\left(1 + \frac{12 \cdot h}{2}\right)^{-\frac{1}{2}} + 0,041 \cdot \left(1 - \frac{w}{h}\right)^2\right), \frac{w}{h} < 1. \end{cases} \quad (3)$$

При учёте толщины проводника эффективная диэлектрическая проницаемость, согласно учебному пособию [5], будет рассчитываться по формуле:

$$\varepsilon_{reft} = \begin{cases} \varepsilon_{ref}, \frac{t}{h} < 0,005, \\ \varepsilon_{ref} - \frac{(\varepsilon-1) \cdot t}{4,6 \cdot \sqrt{w \cdot h}}, \frac{t}{h} \geq 0,005. \end{cases} \quad (4)$$

Для определения эффективной диэлектрической проницаемости, с учётом частотной зависимостью (рабочая частота составляет $f=1,68$ ГГц, а диэлектрическая проницаемость материала измерялась при $f=1$ МГц) используется теория Дебая и волновая теория, обусловленные инерционными процессами поляризации, описанными в статье [7]

Для расчёта эффективной диэлектрической проницаемости, с учётом частотной зависимости вводятся дополнительные функции.

Волновое сопротивление Z_B без учёта дисперсии. Согласно информации статьи [7] Z_B рассчитывается по формуле:

$$Z_B = \begin{cases} \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot c \cdot \sqrt{\varepsilon_{refl}}} \cdot \ln \left(\frac{8 \cdot h}{w_{eff}} + 0,25 \cdot \frac{w_{eff}}{h} \right), \frac{w_{eff}}{h} \leq 1, \\ \frac{1}{\varepsilon_0 \cdot c \cdot \sqrt{\varepsilon_{refl}}} \left(\frac{w_{eff}}{h} + 1,393 + 0,667 \cdot \ln \left(\frac{w_{eff}}{h} + 1,444 \right) \right)^{-1}, \frac{w_{eff}}{h} > 1. \end{cases} \quad (5)$$

Используя полученное из формулы (5) значение, находится вспомогательный частотный параметр f_p по формуле:

$$f_p = \frac{0,3976 \cdot Z_B}{h}, \quad (6)$$

а также приведённое сопротивление G :

$$G = \left(\frac{Z_B - 5}{60} \right)^{\frac{1}{2}} + 0,004 \cdot Z_B. \quad (7)$$

Формулы (4), (6) и (7) дают возможность найти эффективную диэлектрическую проницаемость с учётом частоты по формуле:

$$\varepsilon_{reff} = \varepsilon - \frac{\varepsilon - \varepsilon_{refl}}{1 + G \cdot \left(\frac{f}{f_p} \right)^2}. \quad (8)$$

Волновое сопротивление с учётом частотной дисперсии определяется выражением:

$$Z_{Bf} = Z_{Bs} - \frac{Z_{Bf} - Z_B}{1 + G \cdot \left(\frac{f}{f_p}\right)^2}. \quad (9)$$

Для нахождения волнового сопротивления с учётом дисперсии необходимо определить опорное волновое сопротивление полосковой линии шириной w_{eff} и толщиной диэлектрического слоя h .

Опорное сопротивление согласно учебнику [5] определяется по формуле:

$$Z_{Bs} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}} \cdot \ln \left(1 + \frac{8 \cdot h}{\pi \cdot w_{eff}} \left(\frac{16 \cdot h}{\pi \cdot w_{eff}} + \sqrt{\left(\frac{16 \cdot h}{\pi \cdot w_{eff}} \right)^2 + 6,27} \right) \right). \quad (10)$$

2.2 Кольцевой мост

Кольцевой мост является одним из основных элементов разрабатываемой схемы.

Его математическая модель согласно информации с сайта [8] описывается матрицей рассеяния:

$$S = \frac{i}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Топология кольцевого моста представлена на рисунке 1.

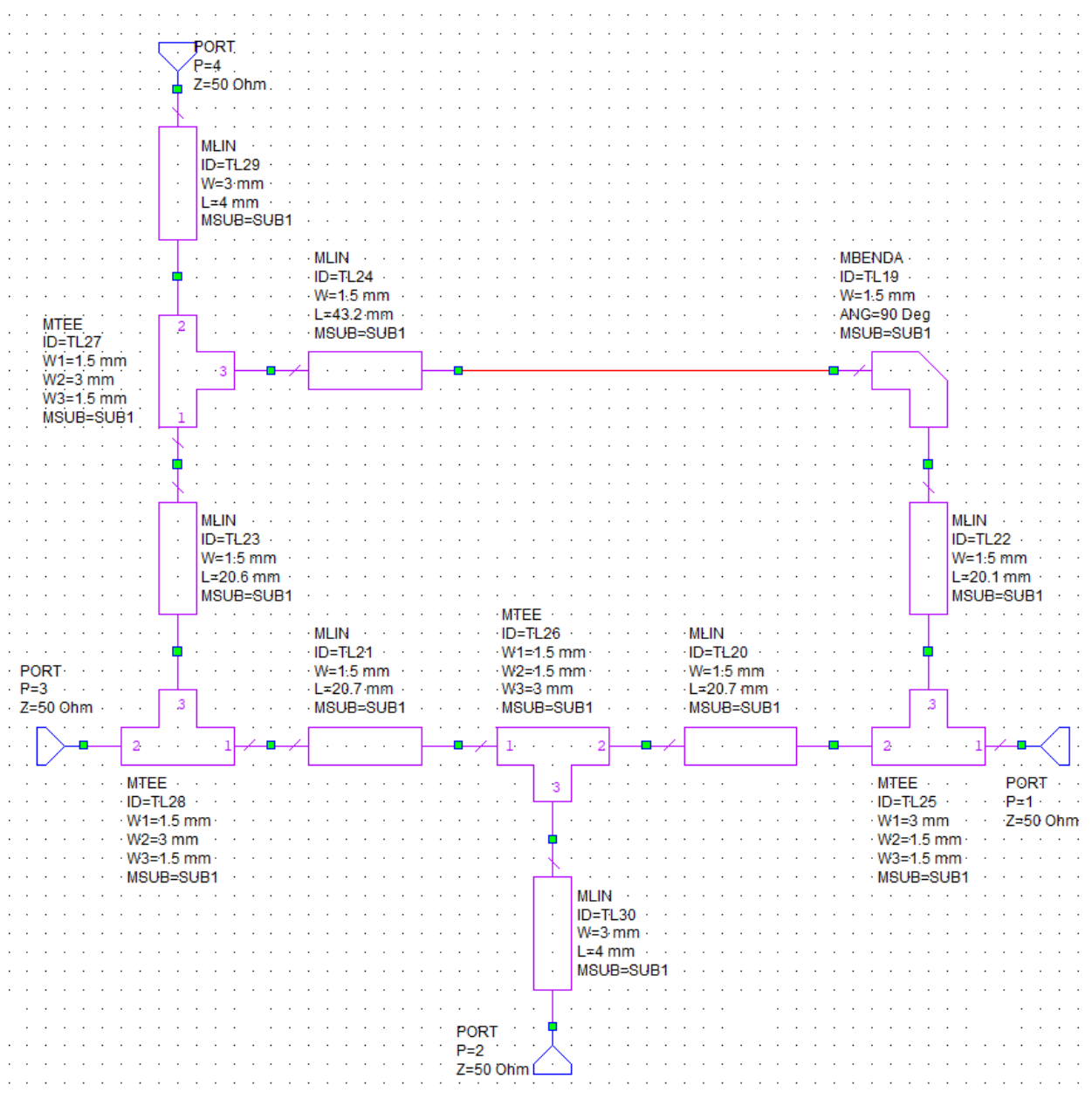


Рисунок 1 – Кольцевой мост, построенный в *AWR Design Enviroment 13*

В кольцевом мосту происходит смена направления распространения волны в линии с однородным волновым сопротивлением.

На практике для выполнения изгиба с низким уровнем отражения используется скошенный изгиб, представленный на рисунке 2.

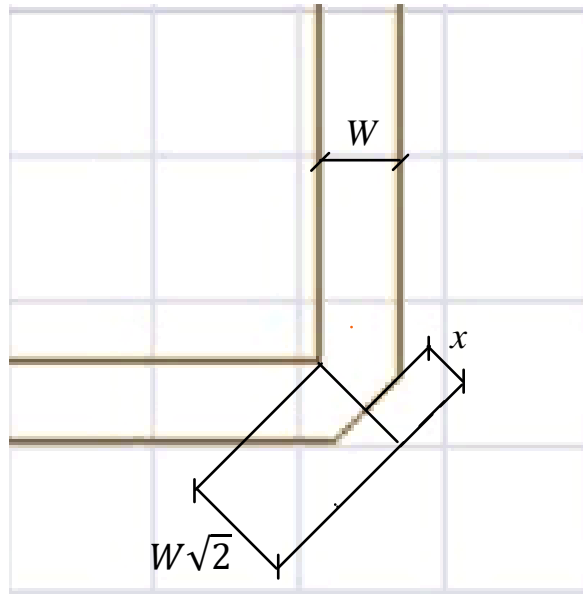


Рисунок 2 – Сопряжение сторон волновода, построенное в *ANSYS HFSS 19.2*

Согласно информации в учебном материале [8], данный метод позволяет добиться значения уровня КСВ от 1,04, при оптимальном отступе x :

$$x_{50\sqrt{2}} = \left(0,52 + 0,65 \cdot e^{-1,35 \cdot \frac{W_{50\sqrt{2}}}{h}} \right) \cdot W_{50\sqrt{2}}. \quad (12)$$

Резкий изгиб ведёт себя как шунтирующая ёмкость, размещённая между плоскостью заземления и изгибом полосы. Уменьшая диагональ, образованную на изгибе $W \cdot \sqrt{2}$ на оптимальный отступ x изгиба, уменьшается площадь металлизации и устраняется избыточная ёмкость.

Важно, что волновое сопротивление кольца должно относиться к волновому сопротивлению линии как:

$$\frac{Z_K}{Z_{Bs}} = \sqrt{2}. \quad (13)$$

Расстояние между плечами волноводного моста рассчитывается по формуле книги [8]:

$$L = \frac{c}{4 \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon_{reff}}}. \quad (14)$$

2.3 Схема суммарно-разностных каналов

Процесс формирования сигналов суммарно-разностных каналов очевиден при рассмотрении рисунка 3.

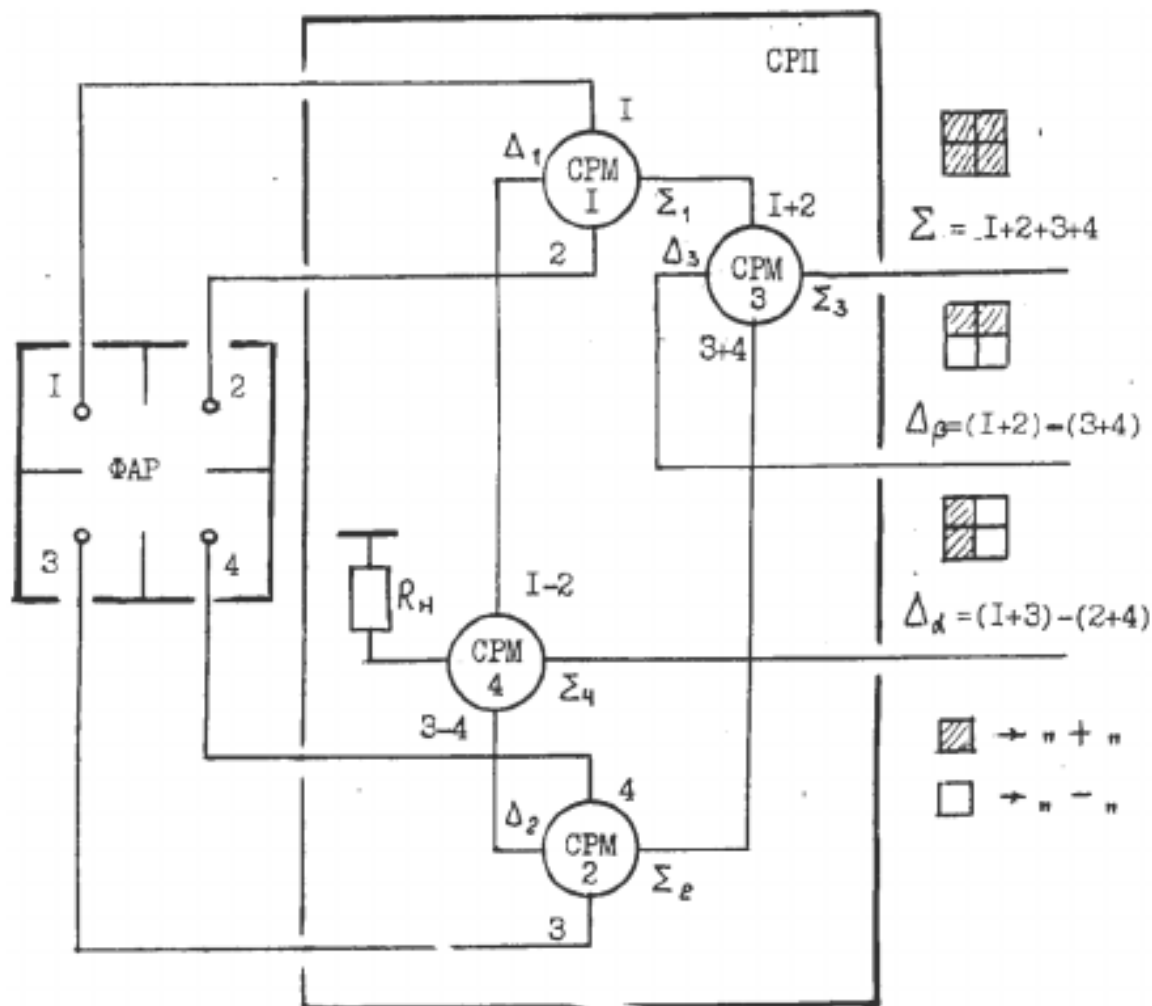


Рисунок 3 – Топология схемы [9]

Из рисунка 3 видно, что выходные сигналы с первого и второго мостов являются входным третьего и четвёртого.

Схема формирования суммарно-разностных каналов давно используется в двух и трёх координатных РЛС, но имеет не планарную структуру. При использовании коаксиального возбуждения возможно добиться планарной структуры, представленной на рисунке 4.

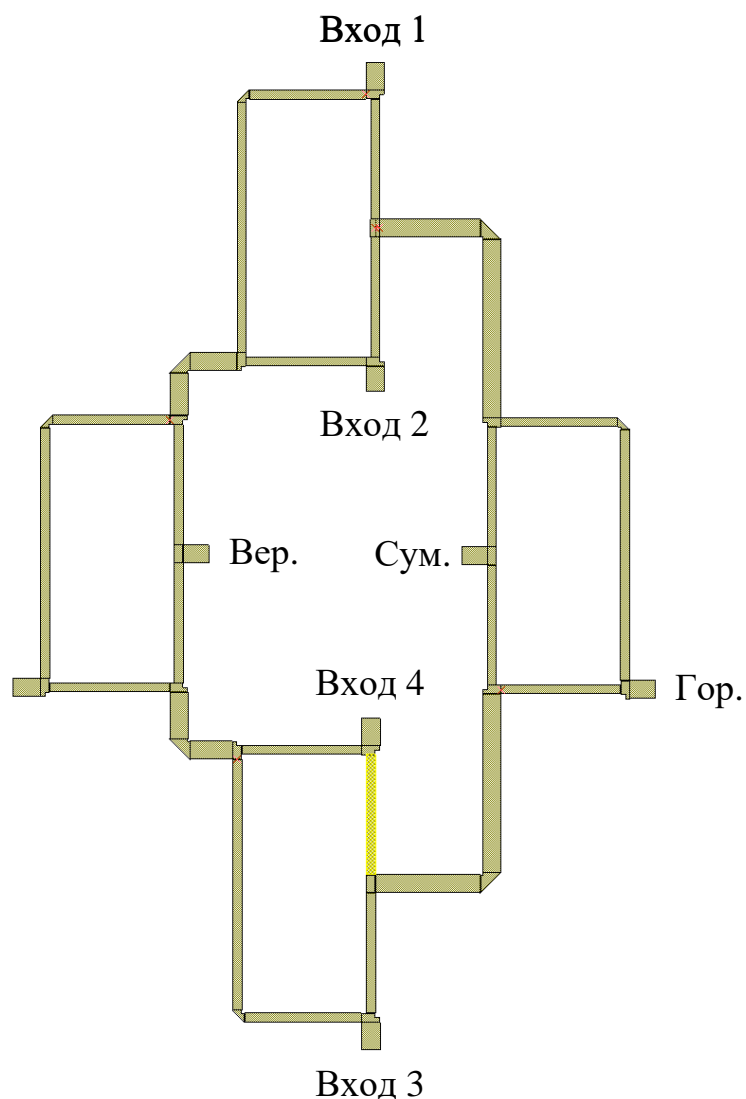


Рисунок 4 – Топология проектируемого устройства, построенная в *AWR Design Enviroment 13*: Гор. – канал суммы сигналов первой и второй подрешётки, Вер. – канал суммы сигналов первой и третьей подрешётки, Сум. – канал суммы сигналов всех подрешёток

При данном соединении общая матрица рассеяния будет иметь вид:

$$S = \begin{bmatrix} 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & -0,5 & 0,5 & -0,5 & 0,5 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & -0,5 & 0,5 & 0,5 & -0,5 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & -0,5 & -0,5 & -0,5 & -0,5 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & -0,5 & -0,5 & 0,5 & 0,5 \\ -0,5 & -0,5 & -0,5 & -0,5 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,5 & 0,5 & -0,5 & -0,5 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ -0,5 & 0,5 & -0,5 & 0,5 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,5 & -0,5 & -0,5 & 0,5 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

При том, что схема формирования суммарно-разностных каналов предполагает три выхода, в матрице имеется четвёртый выход. Четвёртый выход замыкается на согласованную нагрузку.

Изгиб в линии между мостами осуществляется тем же способом что и на рисунке 2, оптимальный отступ находится из формулы:

$$x_{50} = \left(0,52 + 0,65 \cdot e^{-1,35 \cdot \frac{W_{50}}{h}} \right) \cdot W_{50} \cdot \sqrt{2}. \quad (16)$$

3 Разработка и проектирование в САПР

Расчёты параметров линии проводились программно. Была реализована таблица *Microsoft Office Excel*, учитывающая ветвления.

Пользуясь формулами раздела 2, вычисляются характеристики, приведённые в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики микрополосковой линии

Параметр	Значение
$W_{50}, \text{ м}$	0,00312
$W_{50 \cdot \sqrt{2}}, \text{ м}$	0,00154
$L, \text{ м}$	0,02291
$\epsilon_{\text{reff } 50}$	4,01
$\epsilon_{\text{reff } 50 \cdot \sqrt{2}}$	3,79
$t, \text{ м}$	0,000035
$h, \text{ м}$	0,00197
$x_{50}, \text{ м}$	0,00186
$x_{50 \cdot \sqrt{2}}, \text{ м}$	0,00115
$\alpha_{50}, \text{ Нп/м}$	0,58
$\alpha_{50 \cdot \sqrt{2}}, \text{ Нп/м}$	0,54

При компьютерном моделировании использовались САПР *ANSYS Electronics Suite 19.2* и *AWR Design Environment 13* и значения таблицы 1.

Была создана модель планарной схемы формирования суммарно-разностных каналов с коаксиальным возбуждением, представленной на рисунке 4.

При анализе электронной модели были получены зависимости КСВ от частоты для четырёх входов (согласно техническому заданию), представленные на рисунке 5.

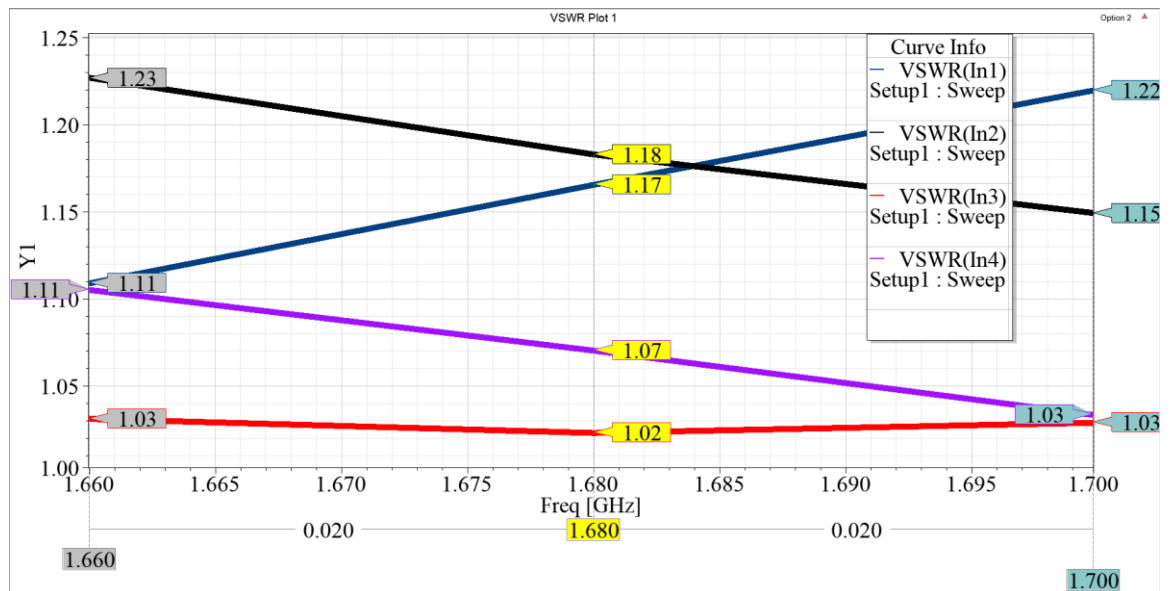


Рисунок 5 – Графики зависимости КСВ входов от частоты, построенные в *ANSYS HFSS 19.2*: синяя линия – вход 1, чёрная линия – вход 2, красная линия – вход 3, фиолетовая линия – вход 4

Зависимость частотной развязки выходных каналов представлена на рисунке 6.

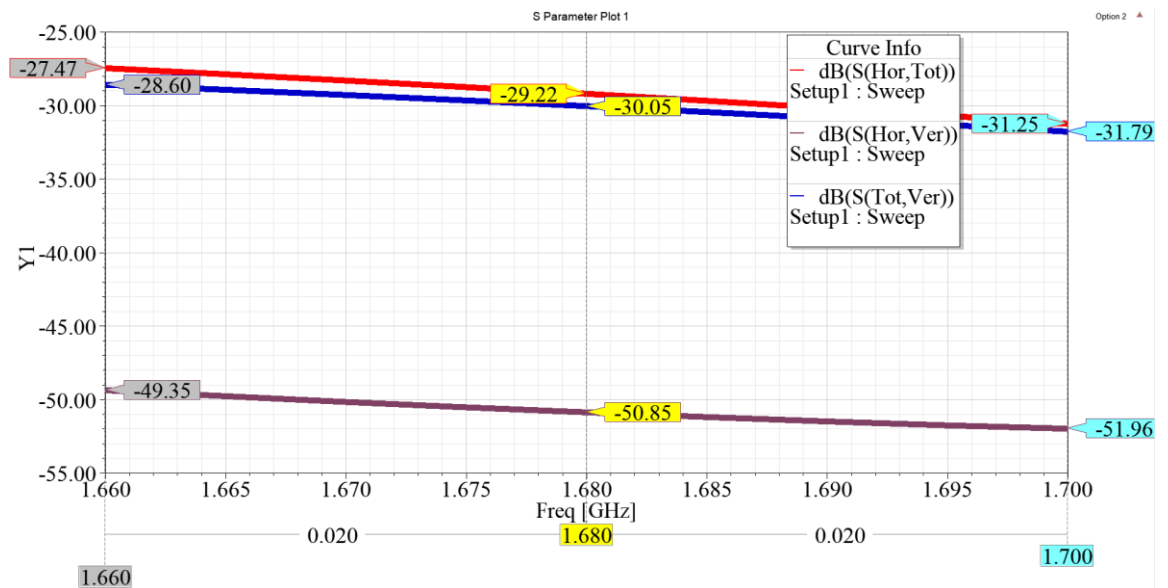


Рисунок 6 – Развязка каналов, построенная в *ANSYS HFSS 19.2*: красный – линия Гор.–Сум., синий – линия Сум.–Вер., чёрный – линия Гор.–Вер.

Значение КСВ соответствует техническому заданию на центральной частоте, на краях диапазона отклонение составляет менее 2,5 %.

Развязка каналов соответствует техническому заданию на центральной частоте, на краях диапазона отклонение составляет менее 8,1 %.

Для проверки работоспособности схемы формирования суммарно-разностных каналов радиолокатора были построены фазовые зависимости выходных каналов от частоты, представленные на рисунке 7–9.

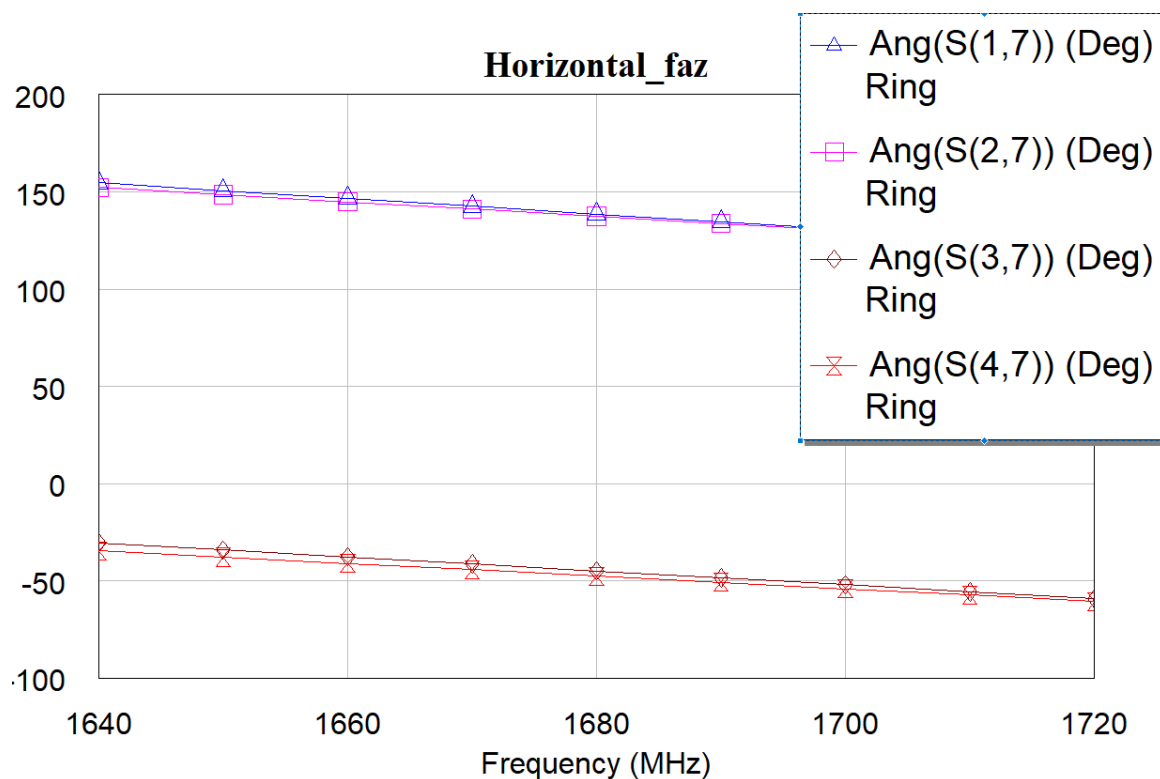


Рисунок 7 – Фазовые зависимости сигналов Гор. канала, построенная в *AWR Design Enviroment 13*: треугольник – фаза сигнала с входа 1, квадрат – фаза сигнала с входа 2, ромб – фаза сигнала с входа 3, притивоположно направленные треугольники – фаза сигнала с входа 4

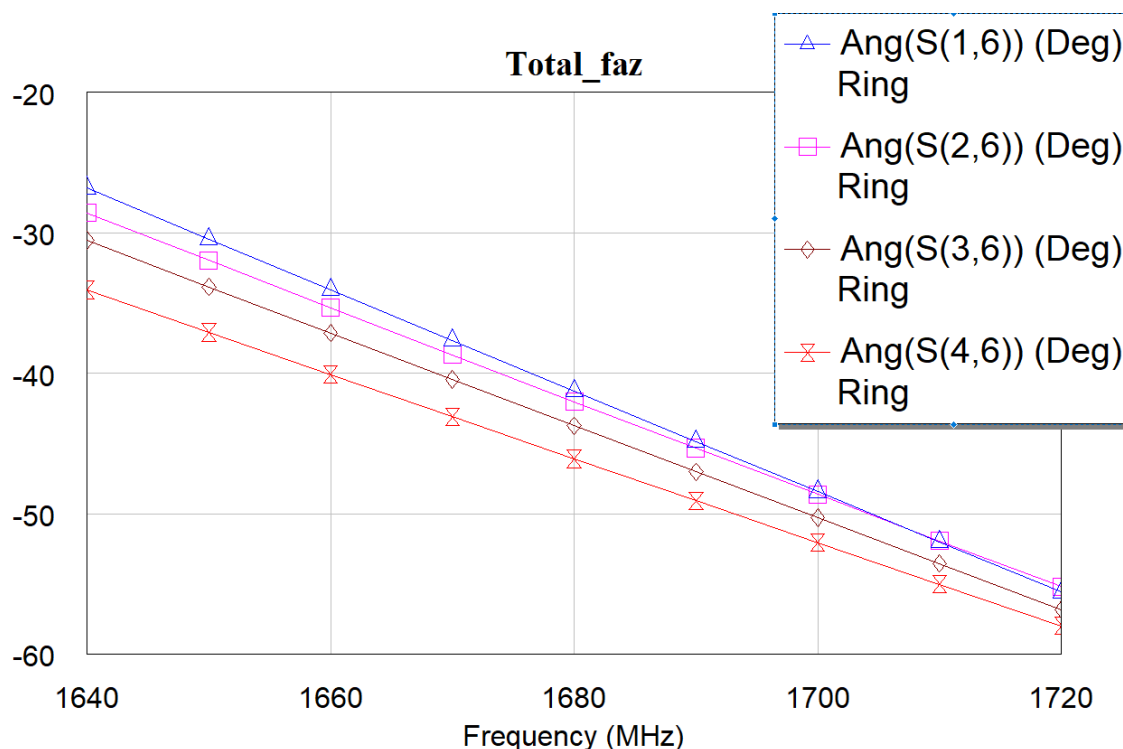


Рисунок 8 – Фазовые зависимости сигналов Сум. канала, построенная в *AWR Design Enviroment* 13: треугольник – фаза сигнала с входа 1, квадрат – фаза сигнала с входа 2, ромб – фаза сигнала с входа 3, притивоположно направленные треугольники – фаза сигнала с входа 4

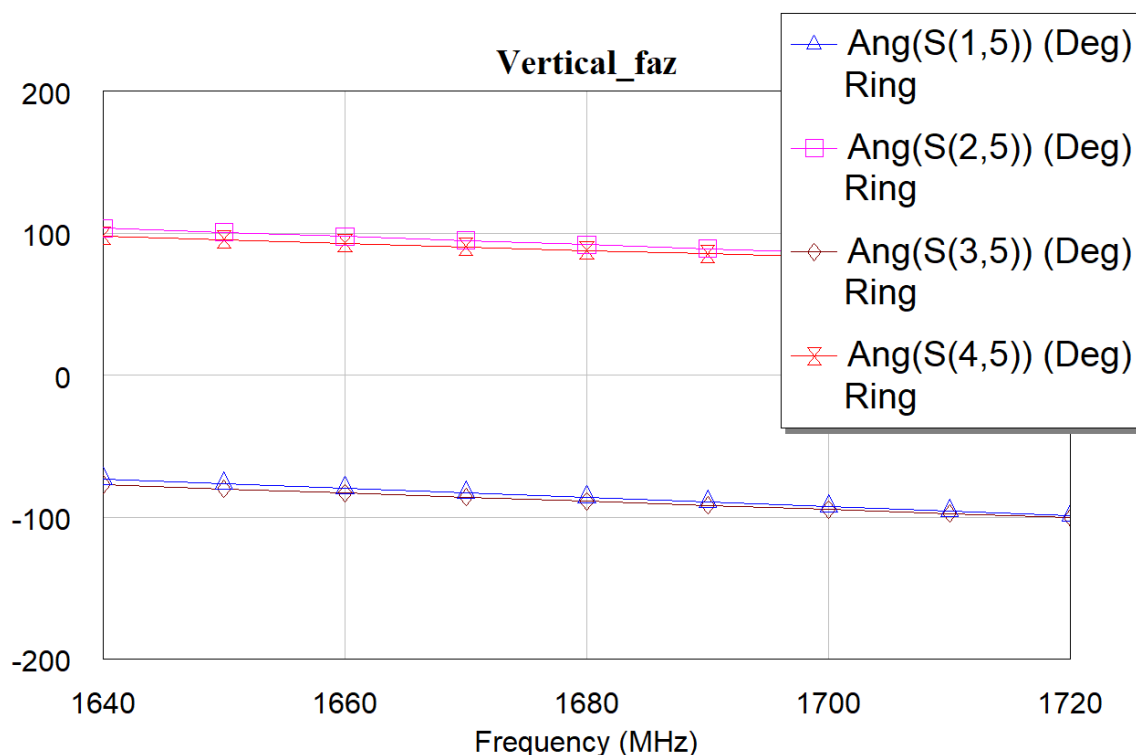


Рисунок 9 – Фазовые зависимости сигналов Вер. канала, построенная в *AWR Design Enviroment* 13: треугольник – фаза сигнала с входа 1, квадрат – фаза сигнала с входа 2, ромб – фаза сигнала с входа 3, притивоположно направленные треугольники – фаза сигнала с входа 4

Данные рисунка 7–9 соответствуют математической модели проектируемого устройства.

Для проверки работоспособности устройства при разном движении цели были рассмотрены структуры поля, представление на рисунке 10–12.

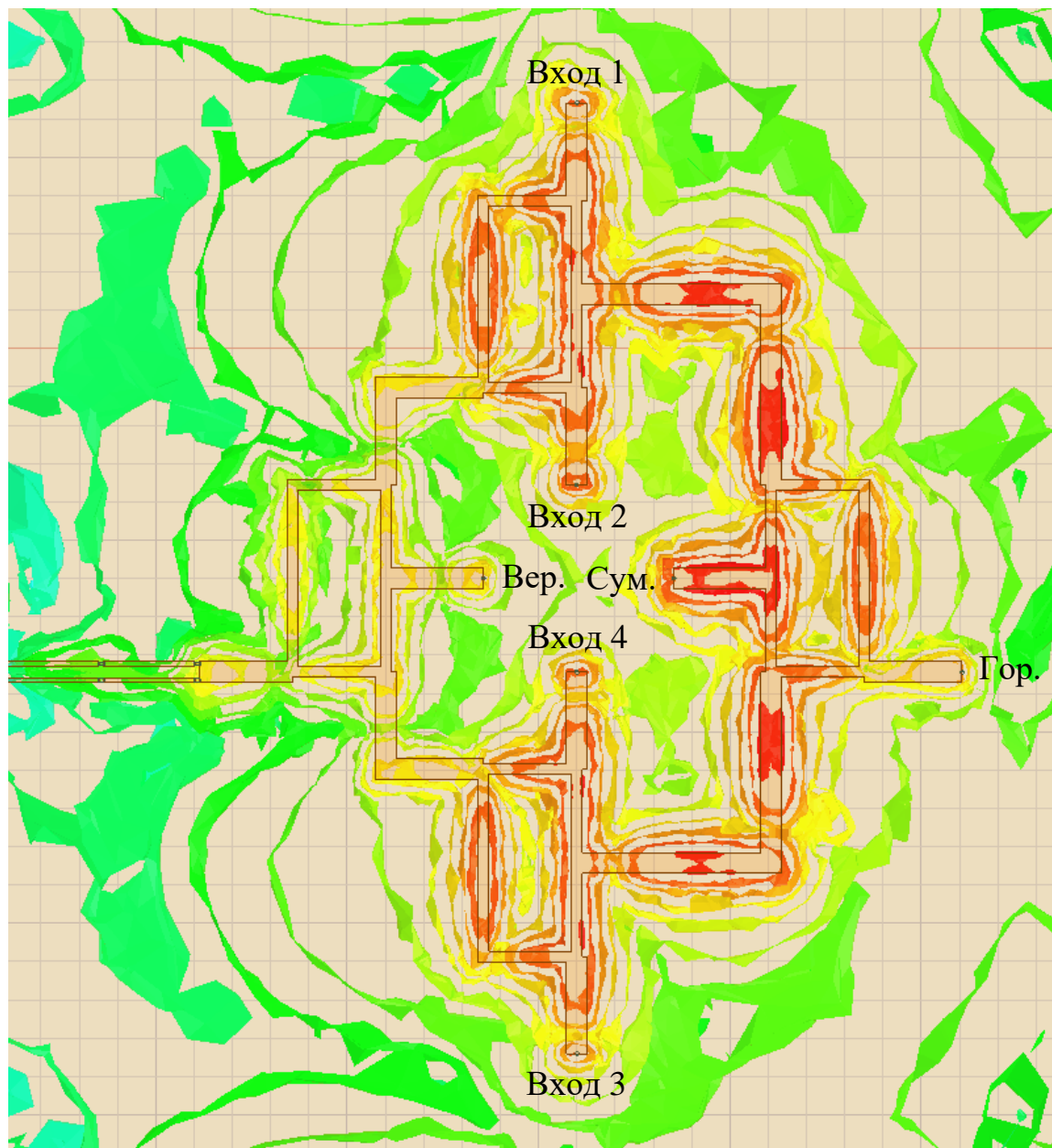


Рисунок 10 – Структура поля, построенная в *ANSYS HFSS 19.2*, для случая: вход 1–1 В, вход 2–1 В, вход 3–1 В, вход 4–1 В

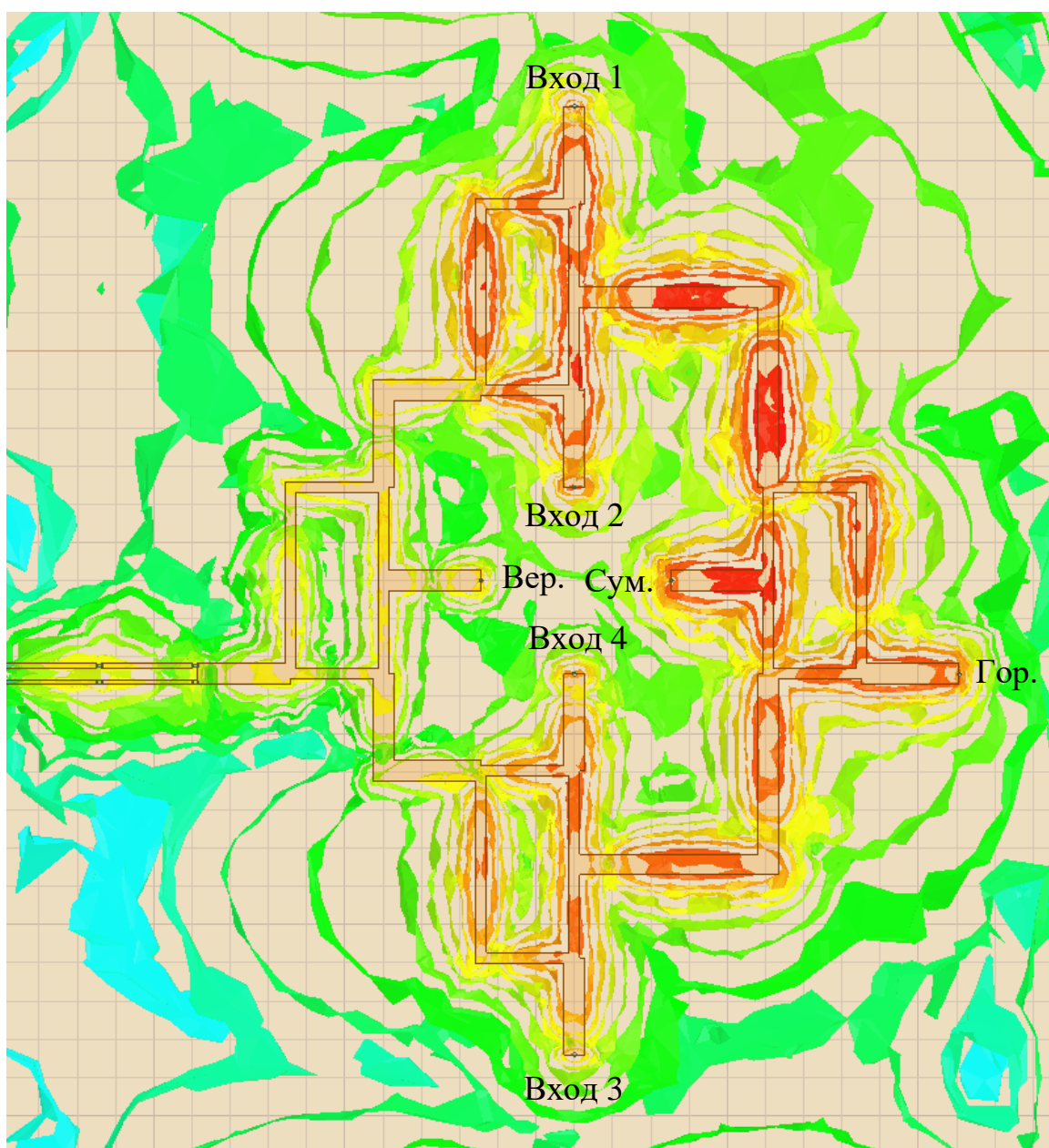


Рисунок 11 – Структура поля, построенная в *ANSYS HFSS* 19.2, для случая: вход 1–1 В, вход 2–1 В, вход 3–0,5 В, вход 4–0,5 В

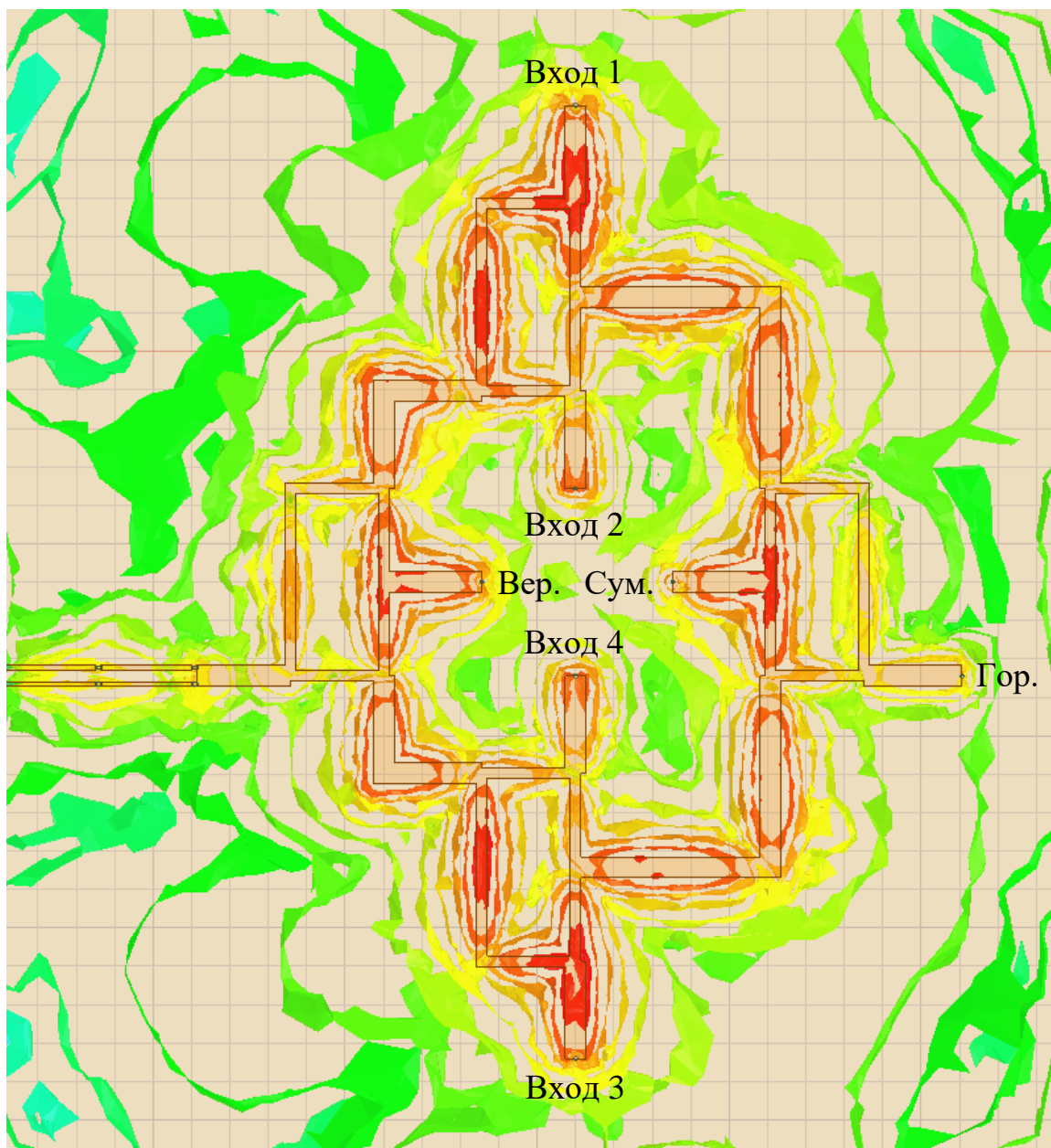


Рисунок 12 – Структура поля, построенная в *ANSYS HFSS 19.2*, для случая: вход 1–1 В, вход 2–0,5 В, вход 3–1 В, вход 4–0,5 В

Структура поля схемы формирования суммарно-разностных каналов при движении цели на РЛС представлена на рисунке 10 (амплитуды сигналов, поступающих на ФАР равны). Почти вся энергия поступает на суммарный канал.

В случае движения цели в верхней полусфере по горизонтали большая часть энергии делится суммарным и горизонтальным каналами, как показано

на рисунке 11. При этом согласно матрице рассеяния значительная часть энергии с 4 кольцевого моста уходила на входы 3 и 4, а энергия с 3 кольцевого моста не вносила существенного влияния на входы 3 и 4.

При движении цели в правой полусфере по вертикале большая часть энергии делится между суммарным и вертикальным каналами, как показано на рисунке 12. Сигналы со 2 и 4 входов полностью гасились сигналами 1 и 3 входов.

4 Программа экспериментальных исследований

4.1 Описание технических средств

Векторный анализаторы цепей *ROHDE&SCHWARZ ZVH8* согласно паспорту измерительного устройства на сайте [10] предназначен для измерений составляющих спектра, S – параметров многополюсников: ослабление, модуль коэффициента отражения и передачи и KCB.

Принцип действия основан на раздельном измерении параметров проходящей, отражённой и падающей волн сигнала с применением направленных ответвителей, на многократном преобразовании частоты перестраиваемым супергетеродинным приёмником и индикации входных сигналов.

Конструктивно анализатор выполнен в виде моноблочного прибора настольного использования. Анализатор включает в себя источник высокочастотного сигнала, приёмник опорного и измеряемого сигналов и направленные ответвители.

Метрологические характеристики анализатора приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Метрологические характеристики *ROHDE&SCHWARZ ZVH8*

Общие технические характеристики:	
Количество измеряемых разъемов	2
Тип соединения по ГОСТ ВР 51914	50 Ом, тип N, гнездо
Режим анализатора электрических цепей векторного:	
Пределы допустимой относительной погрешности установки выходного сигнала	$\pm 10^{-6}$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений модуля коэффициента передачи $ S_{21} $ и $ S_{12} $ для диапазона модуля коэффициента передачи, дБ: от минус 50 до 0 дБ от минус 70 до 50 дБ	$\pm 0,2$ $\pm 0,3$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений фазы коэффициента передачи $ S_{21} $ и $ S_{12} $ для диапазона модуля коэффициента передачи, дБ: от минус 50 до 0 дБ от минус 70 до 50 дБ	± 2 ± 3
Модуль коэффициента отражения порта в режиме источника и приёмника сигналов, не более, дБ	-14

4.2 Порядок проведение измерений параметров устройства

Схема формирования каналов является специфицированной сборочной единицей. При производстве был использован сборочный чертёж (приложение А). С информацией о связях элементов схемы формирования можно ознакомиться на схеме электрической функциональной (приложение Б)

Целью экспериментальных исследований, произведённой схемы, является – определение динамической точности работы схемы формирования суммарно-разностных каналов, с учётом флуктуационных ошибок при образовании каналов.

При исследовании характеристик суммарно-разностных каналов совместно с радиолокационной антенной их следует рассматривать как единую систему. При этом фазированная антенная решётка определяет только величину ошибки и диапазон частот.

Значение амплитуды сигнала и его задержки определяется координатами цели в декартовой системе. Добиться постоянства угловой скорости трудоёмкий и затратный процесс, а для принятия решения о функционировании схемы достаточно измерений, при которых генерируемый сигнал сразу подаётся на схему.

Методика исследования развязки каналов на векторном анализаторе цепей *ROHDE&SCHWARZ ZVH8*:

- 1) первый порт векторного анализатора цепей (далее – порт А) подключается к первому порту измеряемого устройства, а второй порт анализатора (далее – порт Б) ко второму порту этого же устройства, остальные порты подключаются к согласованной нагрузке и после подключения указанных портов происходит измерение матрицы рассеяния в интересующем диапазоне частот;
- 2) второй порт устройства отключается от порта Б векторного анализатора цепей, после чего порт Б подключается к третьему порту устройства, а остальные порты нагрузить согласованной нагрузкой и провести измерения;
- 3) повторить второй этап для остальных портов устройства;

4) порт А подключить ко второму порту устройства, а порт Б подключается к третьему порту устройства, а остальные порты устройства нагрузить согласованной нагрузкой, после чего произвести измерения;

5) повторить этап 3;

6) повторить этапы 4 и 5.

Процедура, описанная выше проводится для анализа фазовых характеристик.

Для исследования КСВ на входах используется векторный анализатор цепей *ROHDE&SCHWARZ ZVH8*.

Порт А подключается к исследуемому входу схемы, на остальные разъемы схемы подключается согласованная нагрузка. Данная процедура повторяется для остальных входов схемы.

4.3 Проведение измерений прототипа

В ходе измерений, описанных в разделе 4.2, были получены S – параметры для центральной частоты $f=1,68$ ГГц представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики схемы: коэффициент передачи, дБ/ фаза, рад

	Вход 1	Вход 2	Вход 3	Вход 4	Вер.	Сум.	Гор.
Вход 1	-45,87/ 1,36	-27,69/ 1,55	-25,97/ 2,97	-28,93/ -1,71	-11,85/ -1,51	-7,11/ -0,64	-12,03/ 2,46
Вход 2	-27,69/ 1,55	-44,15/ 0,47	-28,86/ -1,72	-42,03/ 2,88	-7,13/ 1,57	-5,54/ -0,71	-6,2/ 2,41
Вход 3	-25,97/ 2,97	-28,86/ -1,72	-25,61/ 0,96	-23,06/ 1,62	-7,41/ -1,53	-5,61/ -0,71	-5,78/ -0,79
Вход 4	-28,93/ -1,71	-42,03/ 2,88	-23,06/ 1,62	-43,53/ 0,17	-6,87/ 1,57	-9,32/ -0,73	-8,2/ -0,73
Вер.	-11,85/ -1,51	-7,13/ 1,57	-7,41/ -1,53	-6,87/ 1,57	-60,37/ -1,74	-54,04/ 0,07	-45,9/ -1,05
Сум.	-7,11/ -0,64	-5,54/ -0,71	-5,61/ -0,71	-9,32/ -0,73	-54,04/ 0,07	-41,64/ -0,21	-32,69/ 1,48
Гор.	-12,03/ 2,46	-6,2/ 2,41	-5,78/ -0,79	-8,2/ -0,73	-45,9/ -1,05	-32,69/ 1,48	-20,01/ 0,98

Значения коэффициента стоячей волны для входа 1 равно 1,12; для входа 2–1,18; для входа 3–1,04; для входа 4–1,16.

Параметры схемы при экспериментальном исследовании были проверены на линейную зависимость от частоты.

Так как параметры схемы при смене частоты изменялись линейно, то для удобства анализа работы схемы S -параметры были сняты только на краях диапазона.

Результаты измерений представлены в таблице 4 и таблице 5.

Таблица 4 – Характеристики схемы для $f=1,66$ ГГц

	Вход 1	Вход 2	Вход 3	Вход 4	Вер.	Сум.	Гор.
Вход 1	-43,47/ 1,25	-27,03/ 1,68	-31,01/ 3,01	-27,84/ -1,84	-9,73/ -1,43	-8,11/ -0,92	-4,03/ 2,31
Вход 2	-27,03/ 1,68	-47,26/ 0,48	-27,89/ -1,68	-42,1/ 2,95	-5,46/ 1,65	-5,52/ -0,64	-5,98/ 2,53
Вход 3	-31,01/ 3,01	-27,89/ -1,68	-49,63/ 0,87	-22,1/ 1,6	-7,1/ -1,57	-4,28/ -0,76	-5,98/ -0,81
Вход 4	-27,84/ -1,84	-42,1/ 2,95	-22,1/ 1,6	-64,53/ 0,19	-6,87/ 1,57	-7,32/ -0,72	-6,2/ -0,73
Вер.	-9,73/ -1,43	-5,46/ 1,65	-7,1/ -1,57	-6,87/ 1,57	-60,37/ -1,77	-64,1/ 0,1	-65,3/ -1,01
Сум.	-8,11/ -0,72	-5,52/ -0,64	-4,28/ -0,76	-7,32/ -0,72	-64,1/ 0,1	-41,64/ -0,21	-32,69/ 1,48
Гор.	-4,03/ 2,31	-5,98/ 2,53	-5,98/ -0,81	-6,2/ -0,73	-65,3/ -1,01	-32,69/ 1,48	-22,01/ 0,98

Значения КСВ для входа 1 равно 1,1; для входа 2–1,17; для входа 3–1,12; для входа 4–1,21.

Таблица 5 – Характеристики схемы для $f=1,64$ ГГц

	Вход 1	Вход 2	Вход 3	Вход 4	Вер.	Сум.	Гор.
Вход 1	-42,47/ 1,25	-29,03/ 1,62	-30,01/ 2,93	-28,24/ -1,73	-5,73/ -1,5	-11,11/ -0,67	-5,03/ 2,39
Вход 2	-29,03/ 1,62	-48,31/ 0,48	-28,69/ -1,68	-41,1/ 2,83	-4,42/ 1,52	-4,31/ -0,65	-4,88/ 2,66
Вход 3	-30,01/ 2,93	-28,69/ -1,68	-51,33/ 0,87	-23,1/ 1,53	-6,1/ -1,49	-6,28/ -0,68	-2,98/ -0,75
Вход 4	-28,24/ -1,73	-41,1/ 2,83	-23,1/ 1,53	-22,2/ 0,21	-4,42/ 1,61	-7,43/ -0,61	-5,7/ -0,62
Вер.	-5,73/ -1,5	-4,42/ 1,52	-6,1/ -1,49	-4,42/ 1,61	-44,47/ -1,77	-52,1/ 0,09	-55,3/ -1,21
Сум.	-11,11/ -0,67	-4,31/ -0,65	-6,28/ -0,68	-7,43/ -0,61	-52,1/ 0,09	-61,1/ -0,22	-53,99/ 1,62
Гор.	-5,03/ 2,39	-4,88/ 2,66	-2,98/ -0,75	-5,7/ -0,62	-55,3/ -1,21	-53,99/ 1,62	-23,2/ 0,72

Значения КСВ для входа 1 равно 1,15; для входа 2–1,2; для входа 3–1,1; для входа 4–1,19.

Рассматривая элементы таблиц 3–5 с элемента Вер.–Вход 1 до Гор.–Вход 4 видно, что измерения близки к значениям, полученным при компьютерном моделировании, а также выполняется математическая модель схемы, описанная матрицей (15).

При анализе полученных характеристик было принято решение, что устройство полностью функционирует и соответствует заявленным требованиям.

5 Технико-экономическое обоснование внедрения устройства в серийное производство

Оценка экономической эффективности разработки согласно сайту [11], определяется рядом показателей, к которым относят:

- капиталовложение (КВ);
- эксплуатационные расходы;
- абсолютная и сравнительная экономическая эффективность;
- доходы от основной деятельности;
- прибыль.

Капитала вложения представляют собой те средства, которые единовременно вкладываются в разработку устройства.

Медианная заработная плата инженера на территории РФ, согласно данным портала по поиску работы и подбора персонала *HeadHunter* [12], составляет 55 000 рублей в месяц. Также учитывается налог, который платит работодатель в размере 13 % НДФЛ и 30 % взнос в социальный фонд. После перерасчёта заработная плата инженера равна 86900 рублей.

На весь этап разработки было потрачено 540 ч.

Для расчёта «стоимости» часа работы сотрудника используется формула:

$$T = \frac{ЗП}{НЧ}, \quad (24)$$

где T – тарифная ставка часа, руб./ч.;

$ЗП$ – заработная плата за месяц, руб.;

$НЧ$ – норма рабочего времени в часах, ч.

В расчёте принимается $НЧ = 168$ ч.

Подставляя значения в уравнение (24), значение ставки принимает значение $T = 517$ руб./ч.

Стоимость разработки составила $C_{\text{разраб.}}=279320$ рублей.

Стоимость изготовления печатной платы на сайте производителя [13], составляет 40 000 рублей.

Стоимость семи разъёмов $N - 245$ на сайте [14] составляет 2540 рублей.

Стоимость крепёжных элементов: 28 болтов, 28 гаек и 28 шайб согласно на сайте [15] составляет 2268 рублей.

Также учитывается работа монтажника радиоэлектронной аппаратуры, средняя зарплата которого, по данным сайта [16], составляет 40000 рублей, учитывая выплаты предприятия на работника – 63200 рублей. На установку разъёма уходит 30 минут, что даёт затраты в 188 рублей.

Итоговая стоимость изготовления единицы разработанного изделия составила 324326 рублей.

Проектируемое устройство не имеет аналогов заявленному техническому заданию, поэтому рассчитывается абсолютная эффективность проектируемых капитальных вложений по коэффициенту абсолютной экономической эффективности:

$$E = \frac{\Delta\P}{KB}, \quad (25)$$

а также сроку окупаемости капитальных вложений:

$$T1 = \frac{KB}{\Delta\P}, \quad (26)$$

где $\Delta\P$ – прирост прибыли, руб.

Прирост прибыли может быть рассчитан как разность стоимости единицы продукции нового продукта и предшествующего ему.

Согласно сайту производителя [17] стоимость схемы формирования каналов составляет 75 000 рублей. Прирост прибыли в этом случае составляет $\Delta\P=32460$ рублей. Экономическая эффективность и срок окупаемости равны $E=0,101$, $T1=6,9$ года.

Согласно информации сайта [11] показатели абсолютной эффективности и срока окупаемости можно считать удовлетворительными и введение устройства в производство целесообразно.

6 Обзор метода производства

Патент [18] описывает микрополосковую линию передачи, которая представляет собой устройство для передачи электромагнитных сигналов на высоких частотах. Метод производства этой линии передачи включает выбор материалов, нанесение металлической полосы, тестирование и дополнительную обработку поверхности при необходимости. Готовое изделие упаковывается и отправляется на склад для установки в конечном устройстве. Производство микрополосковых линий передачи требует высокой точности и квалификации исполнителей, чтобы обеспечить надёжность и эффективность работы системы.

Первым этапом является выбор материалов для изготовления микрополосковой линии передачи. Обычно используются диэлектрики с низким коэффициентом диэлектрической проницаемости, такие как тефлон или фторопласт. Также необходимо выбрать проводящие материалы для создания металлической проводящей полосы на поверхности диэлектрика.

Изготавливают металлические основания и диэлектрическую плату, в боковых поверхностях которой выполняют продольные пазы. Полосковые проводники устанавливают на диэлектрическую плёнку.

Затем металлические основания закрепляют на внешних поверхностях диэлектрической платы. на обратную сторону диэлектрической плёнки наносят клеевой слой.

Далее происходит нанесение металлической полосы на поверхность диэлектрика. Этот процесс может осуществляться различными методами, такими как фотохимическое травление, напыление или методы печатной платы. В результате получается структура, напоминающая узкую полосу на поверхности диэлектрика.

После этого происходит тестирование готовой микрополосковой линии передачи на соответствие электрическим параметрам. Проводятся измерения

диэлектрической проницаемости материалов, длины и ширины полосы, а также проверяется уровень потерь при передаче сигнала.

В случае необходимости проводится дополнительная обработка поверхности для улучшения электромагнитных характеристик микрополосковой линии передачи. Это может включать в себя нанесение различных покрытий или дополнительных слоёв диэлектрика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы задачи выполнены полностью, цель достигнута.

Разработанное устройство полностью соответствует заявленным требованиям и может быть использовано как институтом в исследуемой антенной системе, так и производителями моноимпульсных РЛС.

Внедрение проекта в серийное производство выгодно так как при оценке технико-экономической эффективности значение экономической эффективности равно $E=0,101$, а срок окупаемости капиталовложений $T1=6,9$ года.

Электронная таблица, созданная для расчёта параметров микрополосковой линии может быть использована в дальнейшем для расчёта линии с иным диапазоном частот и диэлектрическим материалом.

Ознакомиться с результатами работы также возможно на сайте [19].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Моноимпульсный вторичный радиолокатор [Электронный ресурс] // Небесный Щит России «Алмаз-Антей». – 2023. – URL; <https://ok.ru/almazanteymotherlandskysheet/topic/155350644806563> (дата обращения: 22.03.2024).
2. Об утверждении плана мероприятий в отрасли радиоэлектронной промышленности Российской Федерации до 2024 года [Электронный ресурс] // Минпромторг России. – 2021. – URL; <https://minpromtorg.gov.ru/docs/orders/> (дата обращения: 29.04.2024).
3. Патент № 1290457 СССР, МПК H01O 25/02. Диаграммообразующее устройство : № 3669490 : заявл. 02.12.1983 : опубл. 15.02.1987 / Бальсевич А. С., Гвоздев В. И., Дживелегов Б. Л., Петров А. С., Слесарев Ф. Ф., Тютин В. А., Христич. А. Д., Чернушенко А. М. – 3 с. : ил.
4. Патент № 2296347 Российская Федерация, МПК G01S 13/44. Моноимпульсная трёхканальная суммарно-разностная радиолокационная станция : № 2005115551/09 : заявл. 24.05.2005 : опубл. 27.03.2007 / Бутычин А. П., Сулимов Н. П., Матюшин А. С., Тысяцкий Г. С. ; заявитель ОАО «Корпорация «Фазотрон» – научно-исследовательский институт радиостроения». – 11 с. : ил.
5. Техническая электродинамика : [учеб. пособие для электр.-техн. ин-тов связи] / Н. А. Семенов . – Москва : Связь, 1973 . – 480 с. : ил. ; 22 см . – Библиогр.: с. 477 (37 назв.) . – Предм. указ.: с. 478-480 . – 1.33.
6. Соловьянова, И. П. Электродинамика и распространение радиоволн : учебник / И. П. Соловьянова, Ю. Е. Мительман, С. Н. Шабунин ; под общ. ред. И. П. Соловьяновой, Ю. Е. Мительмана; Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина . – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2020. – 411, [1] с. : ил.
7. Костюков, Н. С. Частотные зависимости характеристики диэлектриков по теории Дебая и волновой теории / Н. С. Костюков, Н. В. Ерёмина, Е. А. Растягаев // Естественные и экономические науки. – 2012. – № 59. – С. 26–33.

8. Устройства СВЧ и антенны / Д. И. Воскресенский, В. Л. Гостюхин, В. М. Максимов, Л. И. Пономарев; под ред. Д. И. Воскресенского. Изд. 2-е, доп. и перераб. – Москва: Радиотехника, 2006. – 367 с.: ил.

9. *img-drDQts.png* [Электронный ресурс] // *Studfile*. – 2021. – URL; https://studfile.net/html/2706/219/html_40a6lUA6s7.50e2/img-drDQts.png (дата обращения: 22.03.2024).

10. Описание типа средств измерений [Электронный ресурс] // МаксПрофит. – 2022. – URL; <https://mprofit.ru/catalog/analizator-kabeley-i-antenn-rohde-schwarz-zvh8/> (дата обращения 09.04.2024).

11. Методические указания по выполнению технико-экономического обоснования дипломной работы [Электронный ресурс] // Санкт-Петербургский колледж телекоммуникаций им Э. Т. Кренкеля. – 2018. – URL: <https://sutkt.ru/documents/met/vkr.teo.rrt.pdf> (дата обращения: 22.03.2024).

12. Инженер-конструктор (конструкторский отдел) [Электронный ресурс] // *HeadHunter*. – 2024. – URL: <https://ekaterinburg.hh.ru/vacancies/inzhener-konstruktor-rea> (дата обращения 09.04.2024).

13. СВЧ многослойные/гибридные печатные платы [Электронный ресурс] // Резонит. – 2024. – URL: <https://www.rezonit.ru/pcb/mnogosloynnye-svch> (дата обращения 08.04.2024).

14. N-245 TGT Разъем [Электронный ресурс] // *Alpha-com telecommunications*. – 2024. – URL: https://alpha-com.ru/product/RF_connector_N-245/ (дата обращения 08.04.2024).

15. Шестигранный болт М3 [Электронный ресурс] // *Made-in-China*. – 2024. – URL: https://ru.made-in-china.com/co_gtbolt/product_Hex-Flange-Bolt-DIN-6921-All-Sizes-M3-M5-M6-M8-Stainless-Steel-304-316-A2-A4-Phillips-Cross-Recessed_yshuyeehig.html (дата обращения 08.04.2024).

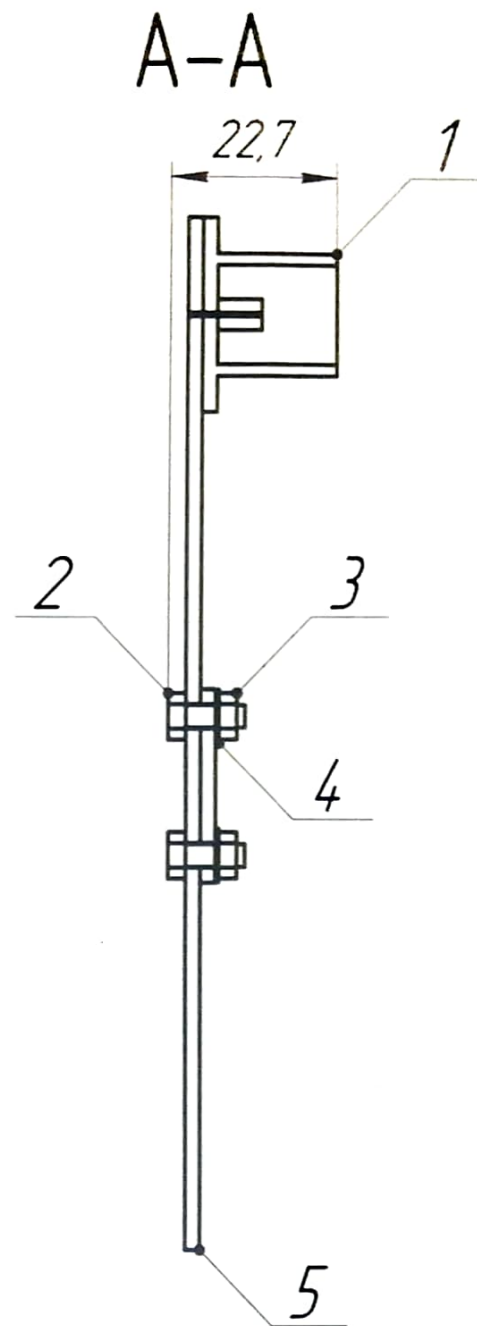
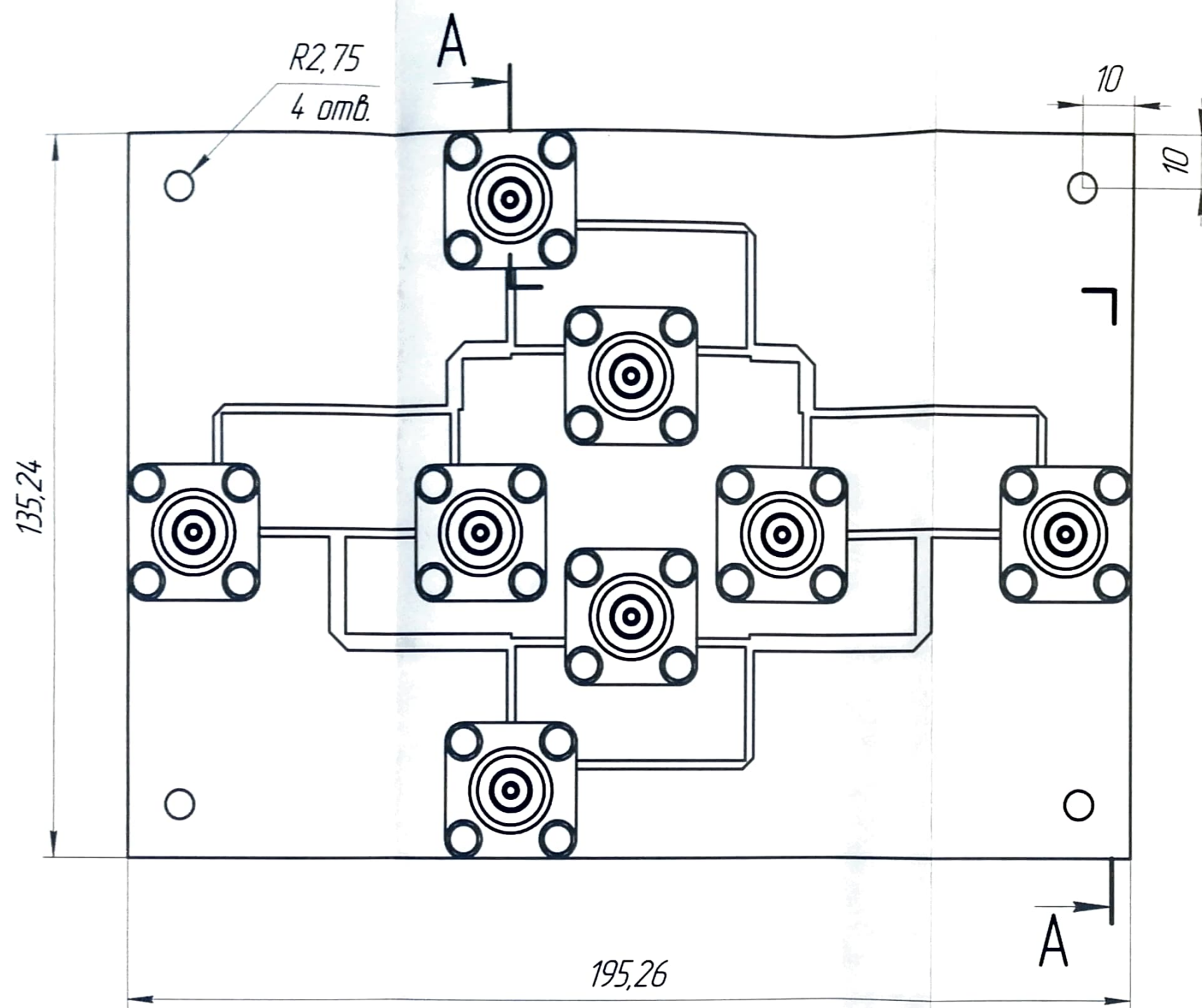
16. Монтажник (сборщик) РЭАиП [Электронный ресурс] // *HeadHunter*. – 2024. – URL: https://ekaterinburg.hh.ru/vacancy/100589365?hhtmFromLabel=similar_vacancies&hhtmFrom=vacancy (дата обращения 09.04.2024).

17. Продуктивная и удобная работа с закупками [Электронный ресурс] // КонтурЗакупки. – 2024. – URL: <https://zakupki.kontur.ru/> (дата обращения 09.04.2024).

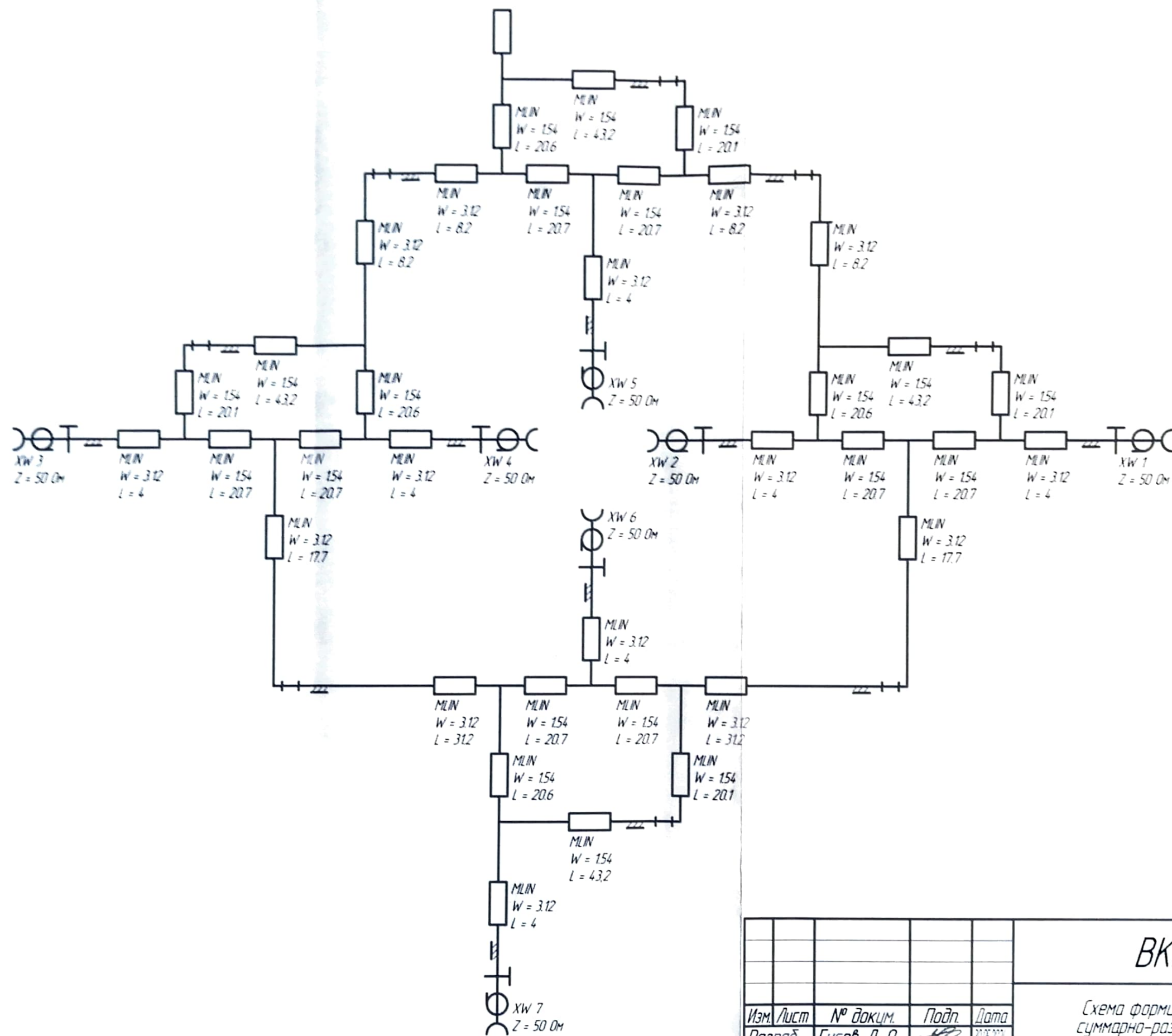
18. Патент № 1753519 СССР, МПК H01P 3/08. Способ изготовления полосковой линии передачи с полосковыми проводниками : № 4788368 : заявл. 05.02.1998 : опубл. 07.08.2000 / Яшин А. А., Одоевцев В. А., Белькевич А. Е., Майорова Н. П. – 5 с. : ил.

19. ВКР Гусев Д. О. РИ-400006 [Электронный ресурс] // Яндекс диск. – 2024. – URL: <https://disk.yandex.ru/d/EnMSYsID61Pg8w/> (дата обращения 02.06.2024).

ВКР-215.2024 СБ



					ВКР-215.2024 СБ			
					Схема формирования суммарно-разностных каналов радиолокатора Сборочный чертёж	Лит.	Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				1:1
Разраб.	Гусев Д. О.	Гусев Д. О.	Гусев Д. О.	30.05.2024				
Пров.	Шадунин С. Н.	Шадунин С. Н.	Шадунин С. Н.	30.05.2024				
Т.контр.						Лист	Листов	1
Н.контр.	Чечеткин В.А.	Чечеткин В.А.	Чечеткин В.А.	07.06.2024	Приложение А Сборочный чертёж	УрФУ ИРИТ-РТФ Школа Бакалавриата		
Утв.								



ВКР-215.2024 32				Лит.	Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	1:1	
Разраб.	Гусев Д. О.	Шабунин С. Н.	С. Н.	2024		
Пров.	Шабунин С. Н.	С. Н.	С. Н.	2024	1	
Т.контр.						
Н.контр.	Чечеткин В. А.	Волков	В. А.	2024	УрФУ ИРИТ-РТФ Школа Бакалавриата	
Утв.						

Схема формирования
суммарно-разностных
каналов радиолокатора
Схема электрическая функциональная

Приложение Б
Схема электрическая
функциональная

Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ
Школа бакалавриата
Направление 11.03.01 «Радиотехника»
Образовательная программа 11.03.01/33.01 «Радиотехника»

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

студент Гусев Данил Олегович группы РИ-400006

1. Тема выпускной квалификационной работы Схема формирования суммарно-разностных каналов радиолокатора

Утверждена распоряжением по институту № 33.02-05/298 от 04.12.2023.

2. Руководитель Шабунин Сергей Николаевич, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой РИТ ИРИТ-РТФ

3. Исходные данные к работе:

- Частота 1680 МГц; технология изготовления – микрополосковая;
- КСВ на входах не более 1,2, развязка между каналами не менее 30 дБ
- Полоса рабочего диапазона не менее 40 МГц
- Схема представляет собой 14-полюсник, выполненный в одной плоскости, 4 входа которого подключаются к одной из четырех подрешеток антенной системы радиолокатора, с одного входа снимается сигнал, пропорциональный суммарному принимаемому всеми четырьмя подрешетками, с двух оставшихся - разностный сигнал, соответственно, в вертикальной и горизонтальной плоскостях
- Разностные сигналы используются для наведения антенной системы на цель, с суммарного канала снимается информационная составляющая, передаваемая с зонда с активным ответом
- Разъемы предварительно N-типа

4. Перечень демонстрационных материалов: презентация

5. Календарный план

№ п/п	Наименование этапов выполнения работы	Срок выполнения этапов работы	Отметка о выполнении (подпись руководителя)
1.	Обзор источников, выбор схемы построения устройства	до 05.03.2024 г.	<i>Волн.</i>
2.	Моделирование конструкции и параметров устройства	до 15.03.2024 г.	<i>Волн.</i>
3.	Разработка топологии устройства	до 25.03.2024 г.	<i>Волн.</i>
4.	Изготовление макета устройства	до 05.04.2024 г.	<i>Волн.</i>
5.	Проведение измерений параметров устройства	до 15.04.2024 г.	<i>Волн.</i>
6.	Анализ работы устройства совместно с антенной системой радиолокатора	до 25.04.2024 г.	<i>Волн.</i>
7.	Предварительное технико-экономическое обоснование работы	до 05.05.2024 г.	<i>Волн.</i>
8.	Анализ результатов и формулировка выводов по работе	до 15.05.2024 г.	<i>Волн.</i>
9.	Оформление пояснительной записки	до 26.05.2024 г.	<i>Волн.</i>

Руководитель _____ Шабунин С.Н.

(подпись)

Студент задание принял к исполнению 01.02.2024 г. _____ Гусев Д.О.

(подпись)